OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	QCD chaos in hadronic phase via holography
Author(s)	芥川, 哲也
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/81999
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　芥川　哲也　）	
論文題名	QCD chaos in hadronic phase via holography （ホログラフィー原理を用いたハドロン相におけるQCDのカオスの研究）

論文内容の要旨

本論文はQCDに存在するカオス、特にハドロン相のカオスについてホログラフィー原理を応用して解析した研究である。素粒子の標準模型の中でもQCDは強結合で非線形性の強い理論である。一方、カオスの指標は系の非線形性を評価できるためQCDの特徴を抽出できると期待される。高温度におけるQCDは半古典的な解析からカオス的になると期待されているが、ハドロン相ではどのような性質を持っているか非自明である。

一般に量子系のカオスの評価は難しい。なぜなら、不確定性原理のためカオスの定義である初期値鋭敏性の評価が困難だからである。本研究ではこの問題の解決策の一つであるホログラフィー原理を用いてカオスの解析を行った。ホログラフィー原理はあるd次元の場の量子論と(d+1)次元の古典重力理論が等価であるという主張である。この原理を用いると量子論を双対な古典論で解析できるため、古典カオスの指標を適用出来る。

本論文ではハドロン相に着目し、メソン凝縮とウィルソンループ(またはクォーク間力)の古典カオスを解析した。メソン凝縮はカイラル対称性の自発的破れのオーダーパラメーターであるため、カイラル対称性とカオスの関係があらわに評価できると期待できる。またQCDは低エネルギーにおいて非局所的な物理量が重要であり、ウィルソンループはホログラフィー原理の辞書がよく知られている物理量である。

メソン凝縮は、低エネルギーにおいて1フレーバーのQCDに対応するD4/D6模型を用いて評価できる。しかし、ブレーンの運動を直接評価することは困難であるため、本研究では同じ対称性の構造を持つ古典系の線形シグマ模型がD4/D6模型の低エネルギー有効理論と仮定した。そして、D4/D6模型のパラメーターで表現した線形シグマ模型の場の時間発展を評価した。エネルギーとクォーク質量を軸としてカオスの有無を相図に描くと、クォーク質量が大きくなるほどカオス的になるとわかった。

次にウィルソンループ(またはクォーク間力)を閉じ込め時空として知られるD4-soliton時空上の弦の運動から評価した。この際、静的な弦にパルス波を摂動として加えた後の時間発展を解析した。摂動の大きさとクォーク間距離を軸としてカオスの有無を相図に描くと、クォーク間距離が大きくなるほどカオス的になりにくいとわかった。この結論はQCD弦の端点がカオスの起源と考えた模型と無矛盾である。

また、どちらの物理量についてもパラメーターのスケーリング則から強結合になるほどカオス的になりにくいとわかった。異なるセクターを評価しているにも関わらず共通の結果が得られたことから、ハドロン相においてQCDは強結合になるほどカオス的になりにくいと期待される。

一般に強結合であることは非線形性の寄与が大きくなるため、よりカオス的になると期待される。実際にYang-Mills理論において古典カオスを行った研究ではパラメータのスケーリング則から強結合であるほどカオス的になる。本研究ではその逆の性質が得られたため、ホログラフィー原理を通して量子系の非自明な性質を抽出できたと期待できる。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　芥川 哲也　）			
論文審査担当者		（職）	氏　　名
	主 査	教授	橋本幸士
	副 査	教授	大野木 哲也
	副 査	教授	兼村 晋哉
	副 査	助教	飯塚 則裕
	副 査	教授	保坂 淳

論文審査の結果の要旨

博士論文「QCD chaos in hadronic phase via holography」の論文審査の結果の要旨は、下記の通りである。

芥川氏は、超弦理論のホログラフィー原理を利用することにより、ヤン・ミルズ理論や量子色力学などのポピュラーな場の量子論の物理量のカオスを定量化した。

量子系のカオスの定量的評価は困難であることが知られているが、その解決策の一つとして、ホログラフィー原理を用いて場の量子論を古典重力理論に写像することで古典カオスのリャプノフ指数を利用する方法が提案されている。芥川氏は、この方法を素粒子論で最もよく議論される量子色力学に適用し、理論の対称性とカオスの間の関係を議論した。

ハドロン相における量子色力学のカオス的特徴を研究するため、芥川氏は、「空間一様メソン凝縮」と「クォーク間力」という２つの物理量を採り上げ、それぞれについて初期微動鋭敏性からリアプノス指数を求めた。メソン凝縮はカイラル対称性の自発的な破れの秩序変数として知られているため、そのカオスは対称性の構造とカオスの関係を捉えていると期待され、クォーク間力を与えるウィルソンループのホログラフィックな双対もよく知られており、従来の単なる弦のカオスに量子色力学における物理的意味を与える。

芥川氏はメソン凝縮を D4/D6 ホログラフィー模型を用いて評価し、クォーク質量が大きいほどメソン凝縮がカオス的であることを発見した。また、ウィルソンループを閉じ込め幾何として知られる D4 ソリトン幾何で評価し、クォーク間距離が大きいほどウィルソンループのカオスは小さくなることを発見した。どちらの模型においても、トフーフト結合定数が大きいほどカオス性が低くなる、と言う結果が導かれた。これは通例、結合が強い（非線形効果が大きい）ならカオス的である、という古典ヤン・ミルズ理論の結論とは逆の結果である。すなわち量子的な理論では強結合が大きなカオスを生むのではなく逆の現象が起こることを定量的に示している。

これら、本博士論文で明らかにされた新しいカオス現象は、場の量子論のカオス研究の発展に貢献しており、本論文は博士(理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。